

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2021»

Фактор влияния неотклоняющего поглощения на пороги возбуждения ионно-акустических и ленгмюровских волн в высокоширотной F области ионосферы

Т.Д. Борисова, Н.Ф. Благовещенская, А.С. Калишин

ФГБУ «Арктический и антарктический научно исследовательский институт»
199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д.38.
E-mail: borisova@aari.ru

Представлены результаты исследований порогов возбуждения инициированных нагревом плазменных и ионных линий в F-области высокоширотной ионосферы, возбуждаемых мощными радиоволнами обыкновенной и необыкновенной поляризации КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating по результатам экспериментальных измерений радаром некогерентного рассеяния и численных расчетов.

Ключевые слова: модификация ионосферы, пороги возбуждения, ионно-акустические и ленгмюровские волны

Influence factor of nondeviative absorption on the excitation thresholds of ion-acoustic and Langmuir waves in the high-latitude F region of the ionosphere

T.D. Borisova, N.F. Blagoveshchenskaya, A.S. Kalishin

Arctic and Antarctic Research Institute

Results concerning the excitation thresholds of HF-enhanced ion and plasma lines in the high latitude ionospheric F-region, induced by the ordinary and extraordinary HF pump waves, are presented. Results are based on the data obtained in the course of EISCAT/Heating experiments with the use of the UHF incoherent scatter measurements and numerical calculations.

Keywords: high-latitude ionosphere, excitation thresholds, ion-acoustic and Langmuir waves

При модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризации в областях резонансного взаимодействия формируется ряд неустойчивостей, которые вызывают существенные изменения параметров и поведения ионосферной плазмы [1, 2]. Вблизи резонансных высот КВ радиоволн в ионосфере возбуждаются параметрические распадные неустойчивости: периодическая стрикционная (англ. parametric decay instability, PDI) и аperiodическая стрикционная (англ. oscillating two stream instability, OTSI) [1, 3]. Проявления неустойчивостей PDI и OTSI непосредственно идентифицируются по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн (НР). Радары НР, пространственно совмещенные с КВ нагревным стендом, обеспечивают прямые измерения продольных плазменных волн, такие как ленгмюровские и ионно-акустические [3, 4]. В нагревных экспериментах ленгмюровские и ионно-акустические плазменные волны проявляются в спектрах радара как инициированные нагревом плазменные линии (англ., HF-induced plasma lines, HFPL) в высокочастотном канале измерений радара и усиленные ионные линии (англ., HF-enhanced ion lines, HFIL) – в низкочастотном канале. При О-нагреве HFPL и HFIL возбуждаются при включении нагревного стенда, пороговые мощности их возбуждения на нагревном стенде EISCAT/Heating составляют порядка 25 – 40 МВт, что соответствует значениям пороговых напряженностей электрического поля на ионосферных высотах порядка 0.21 – 0.27 В/м [4]. При низкой эффективной мощности излучения ($P_{\text{eff}} < 200$ МВт) возбуждение параметрических распадных неустойчивостей PDI и OTSI [4] подавляется

развитием тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости (англ. the thermal (resonance) parametric instability) ТПИ [5], ответственной за генерацию мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН), вытянутых вдоль геомагнитного поля.

По данным экспериментов на стенде EISCAT/Heating (Тромсе, Норвегия), определены минимальные значения электрических полей в ионосфере при О- и Х-нагреве, необходимых для возбуждения и существования в течение нагревного цикла HFIL и HFPL одновременно с МИИН [6]. Для О-нагрева выполнено сравнение экспериментальных и теоретических пороговых значений напряженности электрического поля мощной КВ радиоволны, при которых наблюдалось возбуждение искусственных ионосферных турбулентностей (тепловой, ленгмюровской и ионно-акустической) в F2 слое высокоширотной ионосферы.

В настоящей работе представлены результаты исследования минимальных значений электрического поля волны накачки E_{ion} , необходимых для генерации ленгмюровской и ионно-акустической турбулентности в F-области высокоширотной ионосферы в течение длительности нагревного цикла с учетом потерь волны накачки в нижележащих слоях.

Исследования выполнялись по данным экспериментов 2012 - 2015 г.г. на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating (г.Тромсе, Норвегия), когда мощная КВ волна обыкновенной (О-мода) или необыкновенной (Х-мода) поляризации излучалась в направлении магнитного зенита. В периоды нагревных циклов эффективная мощность излучения комплекса P_{eff} изменялась в режиме ступенчатого повышения/снижения P_{eff} от 4 (56) до 580 МВт. Анализ проведен по данным измерений радара некогерентного рассеяния (НР) на частоте 930 МГц и станции вертикального зондирования ионосферы ВЗ, пространственно совмещенных с нагревным комплексом, и результатам численных расчетов.

Расчет затухания. Распространение радиоволны в ионосфере сопровождается потерей части ее энергии, которая преимущественно переходит в тепловую. Следствием этих потерь является затухание, т.е. уменьшение амплитуды поля волны. Расчет напряженности электромагнитного поля волны накачки E_{ion} на ионосферных высотах слоя F2 нагревного стенда EISCAT/Heating определяется выражением [3]

$$E_{ion} \left[\frac{V}{m} \right] = \frac{0.25 \sqrt{P_{eff} [kW]}}{h [km]} \cdot e^{-A}, \quad (1)$$

где h – высота расположения возмущенной ионосферной области от поверхности Земли, A – потери напряженности радиоволны в децибеллах на пути распространения s , рассчитываются как

$$A = -8.68 \int \omega/c \chi \cdot ds. \quad (2)$$

Показатели преломления n и поглощения χ имеют выражение [7]

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\pi\sigma}{\omega}\right)^2}}; \quad \chi = \sqrt{-\frac{\varepsilon}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\pi\sigma}{\omega}\right)^2}}, \quad (3)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость и σ - проводимость плазмы, $\omega = 2\pi f$, f – частота радиосигнала.

Траекторные расчеты и оценка неотклоняющего поглощения в D-, E- и F-слоях ионосферы нагревной волны проводились в приближении геометрической оптики для слоистой ионосферы. В основу вычислений взяты формулы для показателей преломления и поглощения коротких радиоволн с учетом влияния магнитного поля и частоты соударений электронов [7]. При определении затухания напряженности поля волны вдоль траектории распространения в ионосфере, важно использовать

правильные частоты столкновений электронов v_e . При расчете следует учитывать вариации частот столкновений электронов с ионами v_{ei} и нейтральными молекулами v_{en} в зависимости от местного времени, сезона, широты и солнечного цикла. Эти изменения могут привести к различиям порядка 30% в общем ионосферном затухании [8]. При расчете поглощения текущие параметры описания высотных распределений концентрации $N_e(h)$ и температуры $T_e(h)$ электронов ионосферы для каждого эксперимента определялись по данным радара некогерентного рассеяния (930 МГц) НР. Для вычисления частот соударений электронов $v_e(h) = v_{ei} + v_{en}$ использовали известные зависимости, входными параметрами которых являлись данные измерений радара и модели MSIS (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/msis.html>). Расчет затухания электрического поля волны накачки до высоты отражения в ионосфере реализован в среде MatLab.

Результаты эксперимента Эксперименты на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating, излучающего волну накачки с обыкновенной (О-мода) или необыкновенной (Х-мода) поляризацией на частоте $f_H = 7.953$ МГц проводились в дневные часы при спокойных геомагнитных условиях.

На рис.1, в качестве примера, показаны результаты спектральной обработки сигналов радара НР в низкочастотном (а, b, c) и высокочастотном (d) диапазонах 20 октября 2012 г. с 13.30 до 15.00 UT при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения P_{eff} нагревного комплекса и чередовании О/Х-поляризации на частоте 7.953 МГц (e). Вариации во времени максимумов спектральных мощностей S ионных HFIL и плазменных HFPL линий приведены на заданных высотах с максимальными амплитудами S. Шаг интегрирования данных радара по времени – 5 с. Рисунки 1a, 1b, 1c характеризуют изменения во времени спектральных мощностей максимумов ионных линий SIL_D , SIL_0 , SIL_U (downshifted, nonshifted, upshifted ion lines), 1d - спектральных мощностей максимумов плазменных линий SPL (downshifted plasma lines). Значения SPL и SIL приводятся в относительных единицах. Рассчитанные значения эффективной мощности излучения P_{eff} и мощности просачивания P_{leak} с учетом поляризации показаны на рис. 1e. Пошаговое изменение P_{eff} происходило в течение непрерывного 10-минутного цикла нагрева (длительность излучения на каждой мощности составляла 1 мин).

Рис.1 демонстрирует, что SPL и SIL, возбуждаемые на длительных интервалах цикла нагрева, при О-нагреве наблюдаются при более высоких значениях P_{eff} , чем при Х-нагреве. Мощности SPL и SIL при Х-нагреве на 1–3 порядка выше, чем при О-нагреве. Отметим также, что несмещенный относительно нуля максимум ионных линий SIL_0 наблюдался только при использовании волны накачки с Х-модой поляризации.

Рассмотрим конкретный пример влияния изменений высотного распределения $N_e(h)$ и $T_e(h)$ на напряженность электромагнитного поля волны накачки E_{ion} на ионосферных высотах слоя F2. Анализ представленных на рис.1 данных показывает, что в цикле нагрева с Х-модой поляризации 13:46 – 13:56 UT возбуждение HFPL начались на 1-й минуте цикла ($P_{eff} = 62.7$ МВт) и HFIL – на 2-й минуте цикла ($P_{eff} = 198$ МВт), а в цикле 14:16 – 14:26 UT HFPL появились на 2-й минуте цикла ($P_{eff} = 190.2$ МВт) и ионные линии HFIL – на 3-ей минуте при $P_{eff} = 316.9$ МВт. По данным ионозонда непосредственно перед началом циклов нагрева (рис.2) можно видеть, что в 14:14 UT на высотах около 90 км наблюдалось возрастание электронной концентрации N_e по сравнению с моментом 13:44 UT перед циклом 13:46 – 13:56 UT. Результаты вычислений потери напряженности поля волны накачки A по (2, 3) с использованием текущих параметров ионосферы $N_e(h)$ и $T_e(h)$ для двух циклов составили соответственно значения $A \sim 2.8$ дБ и 6 дБ, что привело к изменению E_{ion} . В цикле 13:46-13:56 UT возрастания SPL начались на 1-й минуте нагрева при $E_{ion} \sim 0.201$ В/м и

в цикле 14:16-14:26 UT – на 2-ей минуте при $E_{ion} \sim 0.272$ В/м. Усиления ионных линий в цикле 13:46 – 13:56 UT наблюдались на 2-ей минуте цикла при $E_{ion} \sim 0.358$ В/м и в цикле 14:16-14:26 UT – на 3-ей минуте при $E_{ion} \sim 0.353$ В/м. Минимальные значения E_{ion} для возбуждения ленгмюровских волн волнами накачки с X-модой поляризации для данных циклов составили 0.2–0.3 В/м и для ионных линий более высокие значения 0.35 – 0.36 В/м.

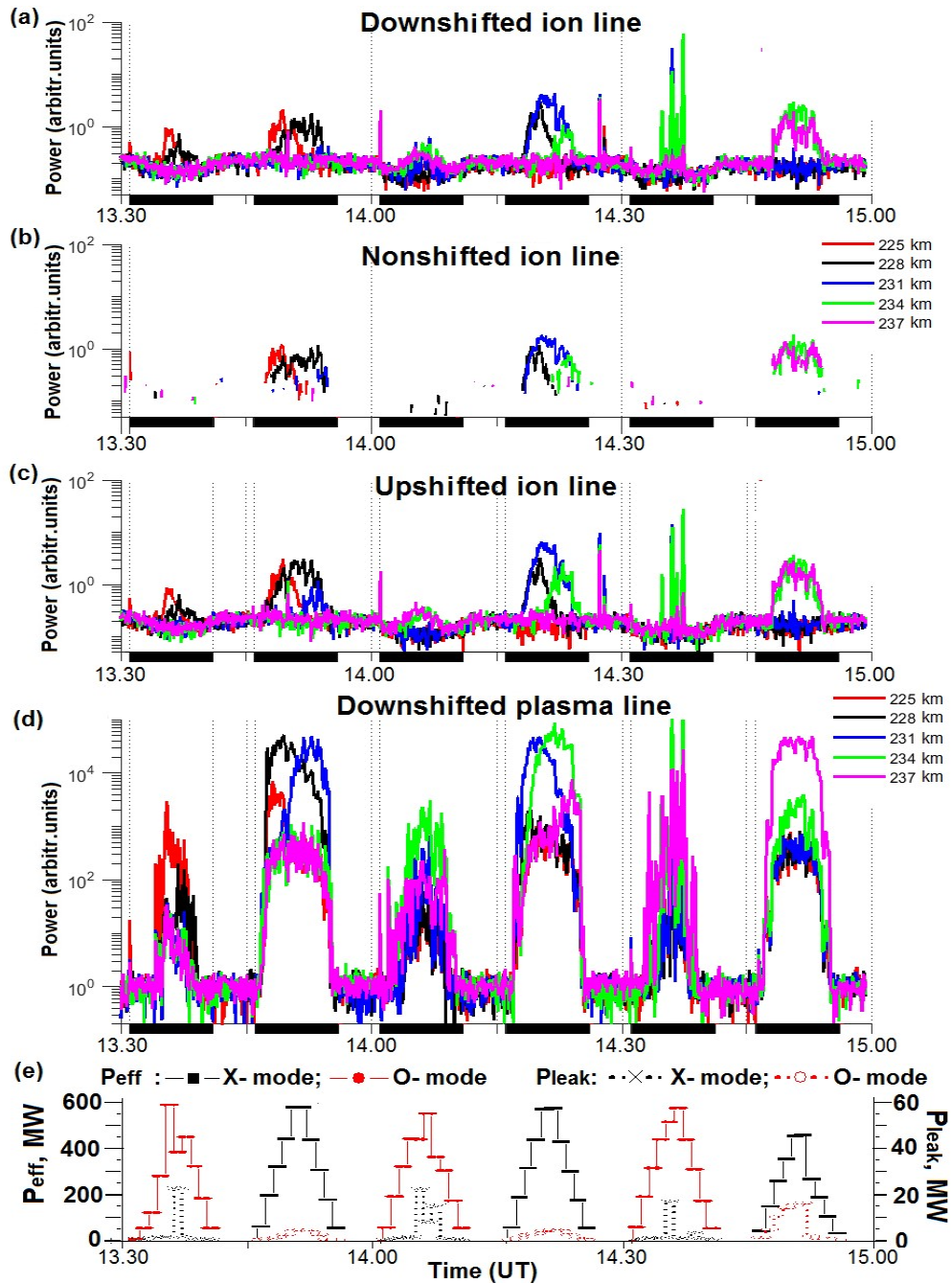


Рис.1. Данные наблюдений радаром НР (930 МГц) 20 октября 2012 г. с 13.30 до 15.00 UT. Вариации мощностей спектральных максимумов на заданных высотах: усиленных нагревом ионных (а – SIL_D , б – SIL_0 , в – SIL_U) и инициированных нагревом плазменных (д) волн. Схема изменения мощностей излучения сигнала P_{eff} и «просачивания» P_{leak} с учетом поляризации - (е).

29 октября 2015г. эксперимент проводился с 13.00 до 14.00 UT также на частоте $f_H = 7.953$ МГц в направлении магнитного зенита. Эффективная мощность излучения P_{eff} комплекса EISCAT/Heating изменялась по схеме 2 мин нагрев и 1 мин пауза в течение 30-минутного цикла нагрева. Поляризация КВ радиоволны (О- или Х-мода) переключалась в каждом цикле. Мощности излучения P_{eff} для цикла с О- модой имели последовательность значений [0 0 0 3 7 13 48 142 292 530] МВт и для цикла с Х-модой – [0 0 7 51 89 121 148 296 440 533] МВт. Критическая частота слоя F2, f_oF2 , в течение часа снижалась от 8.9 МГц до 7.9 МГц.

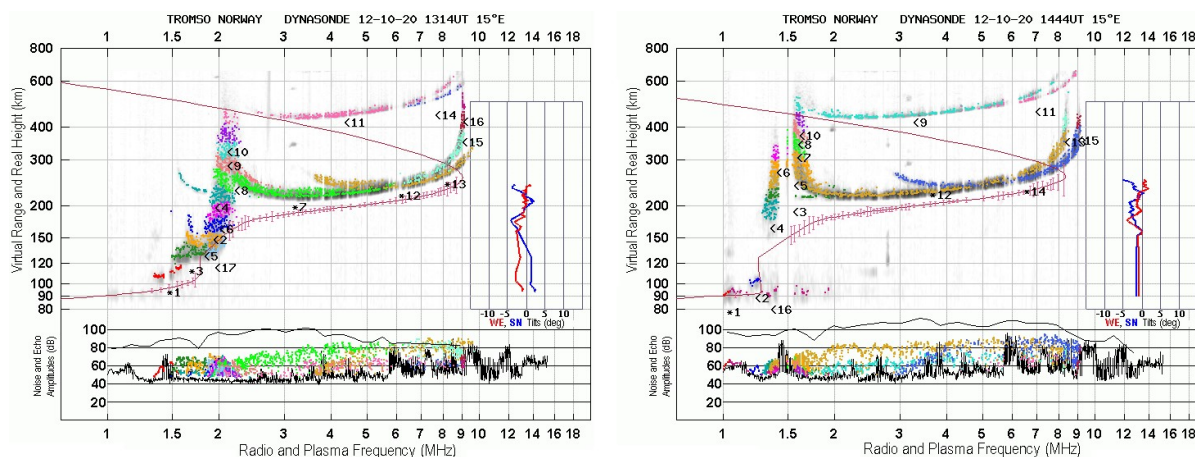


Рис.2. Ионограммы ВЗ ионосферы, измеренные ионозондом EISCAT/Heating 20 октября 2012 г. в 13.14 и 14.44 UT.

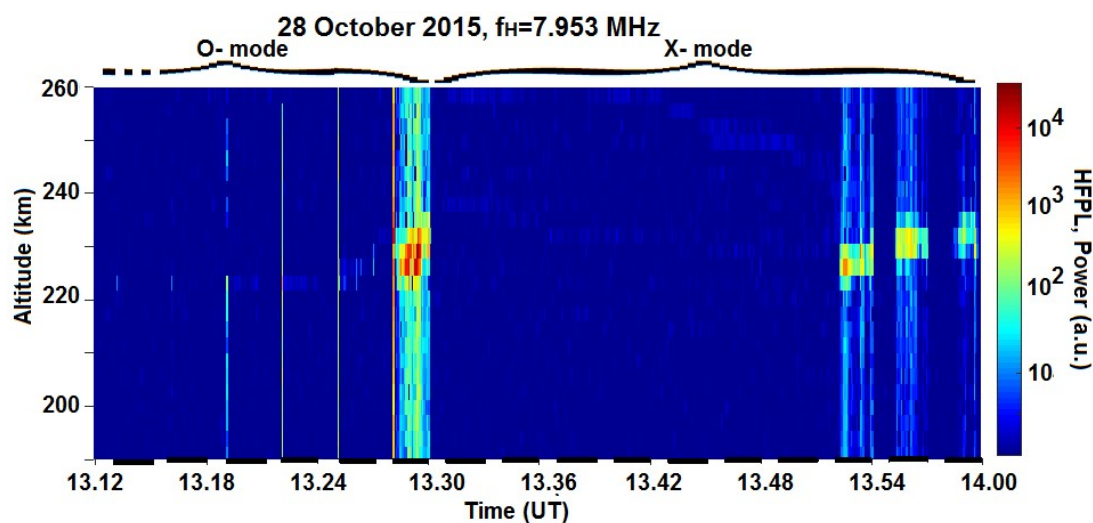


Рис.3. Высотно-временное распределение интенсивностей HFPL по данным измерений EISCAT радара (933 МГц) HP с разрешением 5 с по времени и 3 км по высоте 29 октября 2015 г. О/Х нагрев производился в направлении магнитного зенита на частоте 7.953 МГц. Эффективная мощность излучения ступенчато возрастала от 0 до 530 МВт (+2мин/-1мин) в 30 минутном цикле.

На рис.3 приведено пространственно-временное распределение интенсивностей HFPL по данным измерений радара HP с разрешением 5 с по времени и 3 км по высоте для 29 октября 2015 г. При модификации ионосферы О- модой поляризации эффекты возбуждения плазменных линий наблюдались в диапазоне высот 225 – 235 км при $P_{eff} =$

530 МВт. С учетом рассчитанного затухания $A = 2.5$ дБ поле волны накачки в ионосфере составляло $E_{\text{ion}} \sim 0.7$ В/м. В цикле с X-модой поляризации HFPL появились также на высотах 225 – 235 км, но при $P_{\text{eff}} = 296$ МВт, и при рассчитанном уровне потерь $A = 7.5$ дБ значение электрического поля было существенно меньше, $E_{\text{ion}} \sim 0.28$ В/м.

Анализ результатов экспериментов совместно с рассчитанными уровнями потерь волны накачки с использованием текущих параметров ионосферной плазмы на пути распространения до резонансных высот в ионосфере, позволили исследовать условия возбуждения и характеристики ионно-акустических и ленгмюровских плазменных волн в зависимости от уровня электрических полей E_{ion} волны накачки в высокоширотной F-области ионосферы. Выполнены оценки минимальных значений электрических полей в ионосфере E_{ion} при O/X-нагреве, необходимых для возбуждения ленгмюровской и ионно-акустической турбулентности в F-области высокоширотной ионосферы с учетом неотклоняющего поглощения.

Результаты численных расчетов потери напряженности радиоволны для разных циклов нагрева (с учетом неотклоняющего поглощения в условиях изменчивости фоновой ионосферной плазмы в дневные часы при спокойных геомагнитных условиях) составили для $f_H = 7.953$ МГц при O-нагреве $A \sim 1 - 3$ дБ и при X-нагреве $A \sim 2.8 - 7.5$ дБ. С учетом затухания в нижележащих слоях напряженность электрического поля обыкновенной волны E_{ionO} уменьшается в 1.1 – 1.4 раза и необыкновенной волны E_{ionX} – в 1.4 – 2.4 раза. Минимальные значения электрического поля E_{ionX} на ионосферных высотах, необходимые волнам накачки с необыкновенной поляризацией для возбуждения ленгмюровских волн, составили 0.20–0.30 В/м и ионно-акустических волн – 0.35–0.40 В/м. При X-нагреве возбуждение HFPL начинаются при более низких значениях E_{ion} (на ~ 0.05 – 0.10 В/м ниже), чем начало возрастания мощности усиленных нагревом ионных линий. Значения E_{ionX} , необходимые для возбуждения HFPL и HFIL, при нагреве ионосферы волнами накачки с X-модой поляризации в 1.5 – 2 раза ниже, чем пороговые значения E_{ionO} при модификации ионосферы с O-модой.

Литература

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177. № 11. С. 1145 - 1177.
2. *Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S. et al.* Distinctive features of Langmuir and Ion-acoustic Turbulences induced by O- and X-mode HF Pumping at EISCAT // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2020. V. 125. №7. DOI 10.1029/2020JA028203.
3. *Robinson T. R.* The heating of the high latitude ionosphere by high power radio wave // Phys. Rep. 1989. V. 179. N. 2-3. P.79 - 209.
4. *Stubbe P.* Review of ionospheric modification experiments at Tromsø // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58. N.1-4. P. 349-368.
5. Грач С. М., Караитин А. Н., Митяков Н. А. и др. Параметрическое взаимодействие электромагнитного излучения с ионосферной плазмой // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20. С. 1827.
6. *Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Йоман Т.К., Хаггстром И.* Влияние эффективной мощности излучения нагревного комплекса EISCAT/Heating на возбуждение искусственных ионосферных турбулентностей в высокоширотной F-области ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т.60. №4. С.305-325.
7. Распространение электромагнитных волн в плазме. *Гинзбург В.Л.* // М. Наука. 1967. 684С.
8. *Zawdie K.A., Drob D.P., Siskind D.E., Coker C.* Calculating the absorption of HF radio waves in the ionosphere // Radio Sci. 2017. V.52. P.767–783. doi:10.1002/2017RS006256.